

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Évaluation de la résilience des transports : une revue de la littérature Henderson, Ian

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

<https://doi.org/10.4224/40002694>

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :
<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=d2ef1133-1109-4b44-b012-8fde3439949b>
<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=d2ef1133-1109-4b44-b012-8fde3439949b>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at
<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site
<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at
PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

Rédigé pour : CNRC – Programme IA au service de la logistique (dirigé par Margaret McKay)

Auteur : Ian Henderson

CNRC – Services de renseignement et d'analyse, Services de bibliothèque et de gestion de l'information

Date : 11 décembre 2020

Présentation par la responsable du programme :

Le thème de la résilience dans les transports a pris une nouvelle dimension ces dernières années, en particulier dans le contexte des perturbations liées à la pandémie de 2020.

Le Programme IA au service de la logistique du CNRC vise à soutenir la prochaine génération de technologies fondées sur l'IA pour améliorer le transport des marchandises. En plus des interactions directes avec la recherche, des activités visant à soutenir le développement de l'écosystème et à susciter un intérêt à l'égard des sujets pertinents sont entreprises dans le cadre du Programme IA au service de la logistique.

Lorsqu'on prépare un projet, il n'est pas inhabituel que nos objectifs soient simplement le reflet des informations et des concepts que nous avons à notre disposition. Par conséquent, la première étape logique de tout effort visant à améliorer la résilience des transports consiste à examiner comment ce concept a été défini et évalué par le passé.

Cette analyse documentaire a pour but de fournir un aperçu partiel de la littérature récente dans ce domaine. Nous espérons qu'elle sera utile aux personnes intéressées par ce sujet.

Principales questions

Les questions suivantes ont constitué le point central de l'analyse documentaire :

- Quelles sont les principales définitions de la résilience dans les infrastructures de transport?
- Quels sont les principaux indicateurs et les principales mesures qui peuvent être exploités pour garantir une planification optimale de la résilience?

Portée des documents examinés

La portée de la recherche et du rapport était axée sur les articles et les rapports traitant des définitions de la résilience dans les infrastructures et les transports en termes de mesure et de définition.

Recherche de documents scientifiques et techniques

La recherche documentaire comprend les publications évaluées par des pairs, y compris les périodiques scientifiques, les livres et les comptes rendus de colloque, couvrant des sujets de recherche dans toutes les

disciplines scientifiques et techniques, de la médecine aux sciences sociales en passant par les arts et les sciences humaines.

La documentation sur la « résilience des transports », sa définition et ses indicateurs de mesure offrent de nombreuses possibilités; des efforts ont donc été déployés pour sélectionner les références les plus appropriées. Il convient de souligner que presque tous les articles énumérés ci-dessous fournissent une définition détaillée de la résilience des transports et que nombre d'entre eux abordent les détails des mesures utilisées pour soutenir son évaluation.

Les liens hypertextes figurant dans les références ci-dessous fonctionneront si vos institutions ont accès aux périodiques. Dans le cas contraire, il devrait être possible d'obtenir les articles sur les sites Web des éditeurs.

Les liens fournis ne proviennent pas du réseau du gouvernement du Canada et ne sont pas soumis aux exigences ou au contrôle du gouvernement du Canada. Dans la plupart des cas, les documents auxquels ils renvoient ne sont disponibles qu'en anglais.

Résultats

Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda (en anglais seulement)
Transport Reviews, 2020, 40 (4) : 457-478

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01441647.2020.1728419>

Les réseaux d'infrastructures essentielles, tels que les réseaux de transport et d'électricité, sont indispensables au fonctionnement d'une société et d'une économie. L'augmentation de la demande de transport accroît la congestion des réseaux ferroviaires, qui deviennent ainsi plus interdépendants et plus complexes à exploiter. En outre, on peut s'attendre à l'avenir à un nombre croissant de perturbations dues à des défaillances du système ainsi qu'aux changements climatiques. En conséquence, de nombreux trains sont annulés ou subissent des retards excessifs, et de nombreux passagers n'atteignent pas leur destination, ce qui compromet le besoin de mobilité des clients. Aujourd'hui, il est de plus en plus nécessaire de quantifier les répercussions des perturbations et l'évolution du rendement des systèmes. Cet article de synthèse vise à établir une définition précise de la résilience dans le domaine du transport ferroviaire et présente un examen complet et actualisé des articles sur la résilience ferroviaire. L'accent est mis sur les approches quantitatives. L'article analyse les articles évalués par des pairs dans Web of Science et Scopus de janvier 2008 à août 2019. Les résultats montrent une augmentation constante du nombre d'articles publiés au cours des dernières années. L'article répertorie les mesures et les approches de la résilience. Il a été reconnu que les indicateurs basés sur le système tendent à mieux saisir les effets sur les services de transport et la demande de transport. De plus, l'optimisation mathématique présente un grand potentiel pour évaluer et améliorer la résilience des systèmes ferroviaires. Par ailleurs, les approches fondées sur les données pourraient être utilisées pour une analyse ex post détaillée des perturbations passées. Enfin, plusieurs sujets scientifiques d'avenir sont mentionnés, allant de l'apprentissage à partir de données historiques à la prise en compte de systèmes essentiels interdépendants et de la résilience des collectivités. Les praticiens peuvent également tirer profit de cet ouvrage pour se familiariser avec une terminologie commune et reconnaître les applications possibles pour l'évaluation et la conception de systèmes de transport ferroviaire résilients.

Who cares what it means? Practical reasons for using the word resilience with critical infrastructure operators (en anglais seulement)

Reliability Engineering and System Safety, 2020, 199, art. n° 106872.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832018314832?via%3Dihub>

Résilience, un terme très controversé, avec ce qui semble être une quantité infinie de définitions légèrement différentes selon le secteur, le domaine ou le chercheur qui aborde le sujet, se résume principalement à rebondir après une crise. Pour les infrastructures essentielles (IE), le projet H2020 IMPROVER financé par l'UE a utilisé la définition suivante : « La capacité d'un système d'IE exposé à des dangers à résister aux effets d'un danger, à les absorber, à s'y adapter et à s'en remettre de manière rapide et efficace, afin de préserver et de rétablir les services sociétaux essentiels. » Cette définition a été le point de départ d'une grande partie du travail effectué dans le cadre de ce projet. Cependant, à la suite de six ateliers interactifs avec des exploitants d'infrastructures organisés par le projet IMPROVER, il s'est avéré que la définition de la résilience n'est pas ce qui importe; ce qui importe, c'est la façon dont la résilience change la perspective des exploitants. Cet article présente les résultats d'une analyse thématique essentielle menée sur les discussions tenues lors de ces ateliers. Les résultats reflètent les points de vue des praticiens sur la résilience et coïncident avec une grande partie de la littérature académique actuelle, en particulier celle relative à l'ingénierie de la résilience. L'une des principales conclusions est que la résilience en tant que concept peut être opérationnalisée et que l'absence de consensus sur les détails d'une définition n'est pas un obstacle à l'utilisation du terme ou aux efforts d'opérationnalisation. En effet, la résilience est une approche optimiste par rapport aux pratiques actuelles de gestion des risques, permettant aux exploitants de réagir aux crises en tant qu'acteurs et non en tant que simples sujets exposés aux risques. Bien que de nombreux aspects de la résilience relèvent également de la gestion des risques, la capacité d'apprendre à réagir à des événements inattendus semble habiliter les exploitants.

Approach for measuring transportation network resiliency: A case study on Dhaka, Bangladesh (en anglais seulement)

Case Studies on Transport Policy, 2020, 8 (2), 586-592.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213624X20300225>

Un réseau de transport est crucial pour la prospérité et la croissance des collectivités. Lorsqu'un réseau routier est interrompu, les collectivités rencontrent de nombreuses difficultés. C'est pourquoi les responsables politiques travaillent sans relâche pour garantir la fonctionnalité ininterrompue du réseau de transport. Récemment, la gestion des infrastructures de transport a mis l'accent sur la résilience plutôt que sur la protection. Le concept de résilience vise à saisir la capacité d'un système à maintenir sa fonction et sa rapidité à revenir à un état normal après une perturbation majeure. Cet article présente une nouvelle approche pour mesurer la résilience du réseau de transport en intégrant les habitudes de déplacement. Cette approche permet aux décideurs d'évaluer l'efficacité des stratégies de rétablissement en les comparant avec l'indice de résilience proposé. Ici, l'analogie de la transmission d'énergie est utilisée pour décrire le concept de résilience. L'approche est démontrée dans le cas de Dhaka, au Bangladesh, en se basant sur une simulation de catastrophe. L'étude de cas est axée sur les perturbations potentielles de certains maillons du réseau. Nous nous intéressons aux changements apportés à l'itinéraire le plus court après la perturbation du réseau de transport. Les résultats indiquent qu'un décideur reconstruit d'abord un réseau connecté et se concentre ensuite sur l'amélioration de la fonctionnalité.

Defining resilience (en anglais seulement)

Sustainable and Resilient Infrastructure, 2020, 5 (3), 125-130.

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/23789689.2019.1578166?journalCode=tsri20>

Dans cet article, les définitions de la « résilience », spécifiquement dans le contexte des systèmes de génie civil soumis aux risques naturels, sont explorées. La résilience peut être un attribut souhaité pour un système d'ingénierie, l'un de ses éléments constitutifs ou un système plus vaste au sein duquel il fonctionne. Les

exigences ou les attentes en matière de résilience sont articulées de manière à assurer la continuité des services et des fonctions essentiels (p. ex. la distribution d'électricité, les télécommunications, l'énergie et le transport). Nous examinons une série de questions à prendre en compte pour formuler les exigences de résilience des systèmes d'infrastructure, notamment la hiérarchisation, le triage et le séquençage, ainsi que la capacité à réaliser des investissements supplémentaires d'urgence. Nombre de ces aspects et des décisions associées ont des dimensions politiques, sociales, économiques et donc éthiques. Dans cet article, l'auteur a tenté de formuler certaines des questions importantes qui doivent être posées (et des décisions qui doivent être prises) pour définir, concevoir et concrétiser la résilience des systèmes d'infrastructures d'ingénierie.

Resilience metrics and measurement methods for transportation infrastructure: the state of the art (en anglais seulement)

Sustainable and Resilient Infrastructure, 2020, 5 (3), 168-199.

https://drive.google.com/file/d/12AvsrRq_ewGz5lJBI6akmPGie7s-nMB7/view

Les infrastructures de transport jouent un rôle important dans le soutien de l'économie nationale et du bien-être social. Les événements extrêmes ont causé de terribles dommages physiques aux infrastructures de transport, avec des répercussions socio-économiques à long terme. Un nombre croissant d'études sont consacrées à l'analyse de la résilience des infrastructures de transport afin de soutenir la planification et la conception, ainsi qu'une gestion efficace. En tant qu'examen approfondi, cet article aborde différentes mesures permettant d'évaluer la résilience, et présente les défis fondamentaux liés aux incertitudes et aux interdépendances. Il souligne que les validations des évaluations de la résilience sont limitées en raison de la pénurie générale de données, ce qui peut faire obstacle aux applications pratiques. Enfin, des orientations sont proposées pour les recherches à l'avenir. Cet article donne un aperçu organisé des nombreux axes de recherche dans le domaine, des réalisations et des lacunes à combler.

Measurement and Analysis of the Key Metrics of Information System Resilience (en anglais seulement)

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 751 (1), art. n° 012044.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/751/1/012044>

Compte tenu de la situation actuelle où la résilience des systèmes d'information ne peut être évaluée avec précision, les indicateurs clés qui ont une incidence sur la résilience des systèmes d'information, à savoir la capacité globale du système, la capacité d'absorption maximale du système, la capacité de rétablissement du système et le ratio de rétablissement du système, sont établis. L'article présente également un modèle de calcul des données de ces indicateurs clés. Enfin, la méthode d'analyse de la résilience des systèmes d'information est proposée, et un système de simulation aérospatiale est utilisé à titre d'exemple, ainsi que son mécanisme de double redondance et de non-redondance pour effectuer des essais et des vérifications, ce qui apporte un soutien solide à l'analyse de la capacité de résilience des systèmes.

Evaluating transit network resilience through graph theory and demand-elastic measures: Case study of the Toronto transit system (en anglais seulement)

Journal of Transportation Safety and Security, 2020, 12 (7), 924-944.

<HTTP://10.1080/19439962.2018.1556229>

La fiabilité des réseaux de transport en commun est d'une importance capitale dans le monde entier. Comme de nombreux systèmes de transport en commun sont de plus en plus exposés à diverses causes de perturbation du service, il est nécessaire de mesurer quantitativement la résilience opérationnelle d'un réseau de transport en commun. Cet article présente une approche permettant de mesurer la résilience des transports en commun qui combine plusieurs mesures issues de la littérature existante. En tant qu'étude de cas, l'article examine et quantifie la résilience du réseau de transport en commun de Toronto, au Canada,

face aux perturbations opérationnelles. L'approche adoptée dans cet ouvrage est une combinaison de méthodes quantitatives fondées sur la théorie des graphes, où le réseau de transport en commun est représenté comme un graphe directionnel, et de méthodes d'élasticité de la demande utilisant des modèles de simulation de réseaux de transport pour renforcer les approches de la science des réseaux. Les résultats de la recherche ont révélé les stations essentielles du réseau de métro de Toronto qui, si elles étaient perturbées, auraient des répercussions négatives importantes sur la durée des trajets des passagers. Les raisons de leur caractère essentiel inhérent sont abordées et analysées. Ce travail a également permis de quantifier spatialement la résilience du transport en commun en déterminant les zones à faible risque et les zones à risque à Toronto. Bien que les résultats soient spécifiques à Toronto, ce qui en fait la première étude à analyser la résilience du transport en commun de manière élaborée dans cette ville, les techniques employées peuvent être appliquées à tout réseau de transport en commun suffisamment détaillé.

Transportation infrastructure restoration optimization considering mobility and accessibility in resilience measures (en anglais seulement)

Transportation Research Part C : Emerging Technologies, 2020, 117, art. n° 102700.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X2030615X?via%3Dihub>

Les événements perturbateurs entraînent une dégradation de la capacité de l'infrastructure de transport. Un bon plan de remise en état pourrait minimiser les conséquences de ces événements pendant la période de rétablissement. Ceci est considéré comme un aspect de la résilience des systèmes de transport. Bien que la demande non satisfaite ait été proposée comme une mesure de la résilience pour le transport de marchandises, elle a rarement été utilisée pour les systèmes de transport généraux. Cette étude prend la demande non satisfaite et le temps de trajet total comme deux mesures pour modéliser le problème du plan de remise en état et propose un cadre d'optimisation à deux objectifs et deux niveaux pour déterminer un plan optimal de remise en état des infrastructures de transport. Le problème de niveau inférieur utilise l'équilibre élastique de l'utilisateur pour modéliser le déséquilibre entre la demande et l'offre et mesure la demande non satisfaite pour un réseau de transport donné. Le problème de niveau supérieur, formulé sous forme de programmation mathématique à deux objectifs, détermine l'affectation optimale des ressources pour la remise en état des routes. Les problèmes à deux niveaux sont résolus par un algorithme d'ensemble actif modifié et une méthode de représentation de réseau dérivée des problèmes de conception de réseau. La méthode de la somme pondérée est adoptée pour résoudre le front de Pareto de ce problème d'optimisation à deux objectifs. La méthode d'optimisation du plan de remise en état proposée a été appliquée à un réseau routier typique de Sioux Falls, afin de vérifier l'efficacité de la méthodologie. Pour un scénario de défaillance donné, le front de Pareto de ce problème d'optimisation à deux objectifs et à deux niveaux avec différents niveaux de budget, en se référant à l'efficacité de déplacement de chaque solution, a été illustré pour montrer comment la méthode proposée peut soutenir la prise de décision pour la remise en état du réseau routier.

Measuring Transportation Infrastructure Resilience: Case Study with Amtrak (en anglais seulement)

Journal of Infrastructure Systems, 2020, 26 (1), art. n° 05020001.

<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29IS.1943-555X.0000526>

Résilience : « la capacité d'anticiper les conditions changeantes, de s'y préparer et de s'y adapter, ainsi que de résister aux perturbations, d'y réagir et de s'en remettre rapidement » – Décret-loi n° 13 653

« La capacité du secteur des transports à fonctionner de manière fiable, sûre et efficace est compromise par les changements climatiques » – Rapport « Fourth National Climate Assessment »

Cet article décrit une étude de cas réalisée avec le fournisseur de services ferroviaires voyageurs américain Amtrak qui a mis au point un cadre d'indicateurs pour mesurer la résilience au risque climatique de ses systèmes d'exploitation du corridor nord-est et pour suivre l'évolution de cette résilience au fil du temps. Les représentants d'Amtrak ont examiné les indicateurs et sélectionné ceux qui sont les plus pertinents et aussi les plus faciles à mesurer et à mettre en œuvre chez Amtrak. Vingt et un indicateurs, appelés activités de résilience, étaient axés sur la résilience technique et organisationnelle (leadership et préparation); les principaux résultats à mesurer après une perturbation étaient les suivants : les coûts, la sécurité, la satisfaction des clients, le développement organisationnel et le respect des délais. Des notes ont été attribuées aux activités de résilience pour constituer une base de référence permettant d'évaluer la résilience à l'avenir. Bien que de nombreux chercheurs aient élaboré des cadres ou des indicateurs de résilience, il existe peu d'exemples publiés de mise en œuvre des indicateurs dans des systèmes d'infrastructure. Amtrak se veut progressiste dans son utilisation d'indicateurs de résilience et a participé à ce processus pour accroître la sensibilisation à la résilience au sein de son organisation et déterminer les domaines à améliorer. L'analyse de la notation de base des activités de résilience indique qu'Amtrak se considère comme relativement plus résilient au risque de changement climatique du point de vue de la préparation de l'organisation que du point de vue du leadership organisationnel ou de la capacité technique. Les recherches à l'avenir pourraient inclure le suivi des indicateurs après une perturbation et une réévaluation périodique des notes des activités de résilience.

Linking science to practice: A pragmatic approach for the assessment of measures to improve the resilience of transportation infrastructure systems (en anglais seulement)

Comptes rendus de la 29^e European Safety and Reliability Conference, ESREL 2019, 1351-1356.

<http://rpsonline.com.sg/proceedings/9789811127243/pdf/0426.pdf>

Maintenir et rétablir rapidement la fonctionnalité d'un système d'infrastructure de transport pendant et après des événements perturbateurs est un défi majeur pour les propriétaires et les exploitants. Afin de déterminer les mesures permettant d'accroître la résilience du système et de les classer par ordre de priorité, il est nécessaire de disposer de méthodes qui permettent une évaluation systématique de la résilience et qui soient conformes aux besoins des utilisateurs potentiels. En fonction de l'état actuel de la recherche, une méthode axée sur l'application a été élaborée, qui permet à l'utilisateur de comparer des types de mesures très différents quant à leur effet sur la résilience du système. La méthode mise au point propose trois étapes itératives. Tout d'abord, un examen de la résilience est effectué dans le but de connaître l'état actuel de la résilience du système. Ensuite, les mesures sont évaluées en fonction de leur contribution à l'augmentation de la résilience du système. Enfin, les coûts des mesures sont estimés et mis en relation avec l'efficacité de la mesure. La méthode suggérée est ensuite intégrée dans le contexte d'un concept holistique de gestion de la résilience décrivant la procédure itérative qui doit être suivie pour une gestion efficace et efficiente de la résilience. Pour accroître la convivialité de la méthode, des instructions pratiques ont été fournies au moyen d'un manuel et d'une étude de cas.

Resilience measures for reducing the impact of nature-induced disruptions in transportation supply chains (en anglais seulement)

Joint Annual Conference of Canadian Transportation Research Forum and US Transportation Research Forum: North American Transport Challenges in an Era of Change, CTRF-TRF 2016.

<https://ctrf.ca/wp-content/uploads/2016/05/CTRF2016WhelenKhanTardiffRamseyGPSandTechnology.pdf>

Cet article décrit les vulnérabilités d'origine naturelle dans la chaîne d'approvisionnement de marchandises de la Porte et le Corridor de l'Asie-Pacifique et définit des mesures de résilience qui pourraient atténuer les effets négatifs sur les parties prenantes. Les chaînes d'approvisionnement sont utilisées pour les

marchandises conteneurisées et le charbon, qui sont transportés en tant que marchandise en vrac. Les vulnérabilités sont relevées et caractérisées en fonction de preuves historiques et d'analyses scientifiques. Enfin, la nécessité d'une résilience inhérente et dynamique est mentionnée. En raison de contraintes d'espace, l'analyse des vulnérabilités est axée sur les importations conteneurisées. Prioriser le rétablissement des réseaux de transport à l'aide d'une mesure de résilience

Sustainable and Resilient Infrastructure, janvier 2020. (en anglais seulement)

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/23789689.2019.1708180>

La manière dont les réseaux de transport sont restaurés après une catastrophe naturelle et le moment où ils le sont jouent un rôle essentiel pour assurer le rétablissement après l'événement. Cependant, déterminer les stratégies de réparation optimales en tenant compte des coûts pour l'utilisateur nécessite un effort de calcul intensif, ce qui entrave l'application pratique. Cet article utilise un indice modifié de robustesse des réseaux de transport, une mesure de la résilience, pour minimiser les coûts totaux, y compris le coût de réparation et le coût de déplacement pendant le rétablissement. Pour chaque lien, le programme de réparation est sélectionné parmi plusieurs options en utilisant l'analyse coût/bénéfice différentielle. L'efficacité et l'efficacité de la méthode sont mises à l'épreuve dans le cas d'un réseau endommagé réaliste à Coire, en Suisse. Trois scénarios, avec des ressources différentes en termes de budgets de réparation et de disponibilité des équipes, sont étudiés. Les résultats démontrent que les approximations obtenues à l'aide de la méthode proposée sont similaires aux résultats obtenus à l'aide d'un algorithme heuristique quasi optimal, et réduisent l'effort de calcul et le temps nécessaire.

Resilience modeling concepts in transportation systems: a comprehensive review based on mode, and modeling techniques (en anglais seulement)

Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 2020.

<https://jipr.springeropen.com/articles/10.1186/s43065-020-00008-9>

L'objectif de cette étude exhaustive était de compiler les connaissances les plus récentes sur la résilience du système de transport face aux catastrophes naturelles et causées par l'homme. Cette étude a déterminé les paramètres de mesure de la résilience qui peuvent être utilisés pour formuler des stratégies de quantification et d'amélioration de la résilience d'un système de transport. Les articles examinés ont été classés et résumés sous deux angles : (i) la modélisation fondée sur le mode de transport; et (ii) la modélisation fondée sur la technique mathématique utilisée pour quantifier la résilience. Un des apports uniques de cet article de synthèse est la compilation des principaux indices de résilience qui ont été analysés pour quantifier la résilience. Cet examen a révélé que la majorité des articles scientifiques sur la résilience des systèmes de transport publiés depuis 2006 étaient axés sur la résilience du système de transport routier et que la vulnérabilité était l'un des indices de résilience les plus étudiés pour évaluer la résilience des systèmes de transport. Plusieurs orientations de recherche pour l'avenir ont été déterminées en tenant compte de l'incidence des technologies de transport émergentes (p. ex. la technologie des véhicules connectés et automatisés). L'interdépendance complexe entre les systèmes d'infrastructures essentielles tels que l'électricité, les transports et les systèmes de communication, ainsi que les problèmes de cybersécurité dans le système de transport intelligent avancé, sera déterminante dans l'analyse de la résilience des systèmes de transport de demain.

Resilience of Transportation Systems: Concepts and Comprehensive Review (en anglais seulement)

IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20 (12), 4262-4276.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8602445>

La résilience des systèmes de transport a été largement étudiée au cours de la dernière décennie. Cet article vise à fournir une synthèse de la littérature actuelle sur les transports résilients, en se concentrant sur les concepts et les méthodologies. Une méthode de recherche systématique de la littérature intégrant la recherche dans les bases de données, la recherche dans les périodiques connexes et le supplément de citations est proposée pour sélectionner tous les articles appropriés. À partir des principaux articles sélectionnés, la définition de la résilience est examinée, et certains concepts connexes sont comparés. Le corps principal de l'article est consacré à l'examen des indicateurs et des modèles mathématiques utilisés pour mesurer la résilience et des stratégies utilisées pour améliorer la résilience. Les sous-thèmes les plus populaires sont établis et abordés. Les lacunes actuelles de la recherche sont évoquées, et certaines orientations potentielles de la recherche sont présentées.

Resilience metrics development for power systems (en anglais seulement)
Power Systems, 2019, 101-116.

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-94442-5_4

L'objectif de ce chapitre est d'expliquer les indicateurs utilisés pour quantifier la résilience du système électrique. Il déterminera également la manière dont les indicateurs sont calculés pour chaque système et sous quelles conditions. L'infrastructure de distribution et de transmission, qui s'étend sur une vaste zone géographique, est toujours sujette aux catastrophes climatiques qui se produisent continuellement. Par conséquent, une exploitation sûre et fiable est essentielle pour disposer d'un système électrique résilient, qui puisse résister aux conditions difficiles. Les indicateurs étudiés dans ce chapitre sont quantitatifs et sont définis en fonction de la topologie, du matériel et de l'efficacité du système, des indices de fiabilité, ainsi que du type de menace et de sa gravité. L'évaluation précise de chacun de ces indicateurs peut aider à comprendre correctement le concept de résilience dans les systèmes électriques. De plus, nous pouvons obtenir une évaluation appropriée de la résilience du réseau électrique en sélectionnant un ensemble approprié de ces indicateurs en fonction du type de menace et de notre objectif.

Incorporating Resilience into Transportation Planning and Assessment (en anglais seulement)
Rand Corporation, 2019.

https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR3000/RR3038/RAND_RR3038.pdf

Un système de transport résilient est un système dans lequel les infrastructures essentielles ne sont pas exposées aux dangers ou, si elles le sont, la capacité est suffisante pour atténuer les effets d'un choc. La législation actuelle exige que la résilience soit prise en compte mais ne fournit pas d'orientation sur la manière de l'intégrer dans le processus de planification des transports. C'est pourquoi, dans ce rapport, les chercheurs de RAND présentent un cadre conceptuel permettant d'intégrer la résilience dans la planification des transports. Les chercheurs suggèrent aux planificateurs d'envisager une définition de la résilience axée sur quatre éléments : la capacité d'absorption, la capacité de rétablissement, l'accès équitable et la capacité d'adaptation. La *capacité d'absorption* est l'aptitude du système à absorber les chocs et les contraintes et à maintenir un fonctionnement normal, la *capacité de rétablissement* est l'aptitude à se rétablir rapidement après un choc ou une contrainte et à revenir à la normale, l'*accès équitable* est l'aptitude à offrir des possibilités d'accès à l'ensemble de la collectivité tant en cas de choc ou de contrainte que dans le cadre d'un fonctionnement normal, et la *capacité d'adaptation* est l'aptitude à évoluer à la suite de chocs et de contraintes afin de maintenir un fonctionnement normal.

Stratégie nationale sur les infrastructures essentielles, Sécurité publique Canada, 2019.

<https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrscs/pblctns/srtg-crtcl-nfrstrctr/index-fr.aspx>

Conceptual framework of life-cycle performance measurement: Ensuring the resilience of transport infrastructure assets (en anglais seulement)

Transportation Research Part D : Transport and Environment, 2019, 77, 615-626.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920919304511>

La mise en place d'infrastructures de transport efficaces et efficientes (p. ex. ponts, routes, chemins de fer, voies aériennes et tunnels) est essentielle pour soutenir le bien-être économique et social d'une économie. Les perturbations externes qui surviennent en raison des changements climatiques, par exemple, ont des répercussions sur le rendement. Fournir, gérer et entretenir des infrastructures de transport résilientes et capables de s'adapter à des conditions environnementales changeantes est devenu une priorité pour de nombreux gouvernements dans le monde. La mesure du rendement est essentielle pour garantir que les infrastructures de transport fonctionnent de manière optimale et résistent aux changements externes, car elle permet de déterminer les processus qui doivent être modifiés et améliorés pour renforcer l'adaptabilité des infrastructures tout au long de leur cycle de vie. Malgré l'importance de la mesure du rendement pour assurer la résilience des infrastructures de transport, les gouvernements ne lui prêtent qu'une attention limitée dans l'élaboration de leurs politiques. Par conséquent, cet article examine la littérature existante et propose un cadre de mesure du rendement (CMR) de la résilience du cycle de vie (CMR) dans le contexte des transports. Le CMR élaboré permet de saisir de manière exhaustive les aspects sous-jacents qui sont importants pour : (1) comprendre l'état actuel du niveau de résilience des infrastructures de transport; et (2) accroître la capacité des infrastructures à s'adapter aux changements environnementaux à l'avenir. Les incidences du cadre proposé sur l'élaboration des politiques de transport sont également examinées dans cet article.

Assessing Engineering Resilience for Systems with Multiple Performance Measures (en anglais seulement)

Risk Analysis, 2019, 39 (9), 1899-1912.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/risa.13395>

Récemment, les efforts visant à modéliser et à évaluer la résilience d'un réseau face aux perturbations dues aux menaces environnementales et adverses ont considérablement augmenté. Les chercheurs ont étudié la résilience dans de nombreuses disciplines, notamment la sociologie, la psychologie, les réseaux informatiques et les systèmes d'ingénierie, pour n'en citer que quelques-unes. L'évaluation de la résilience d'un système d'ingénierie prend généralement en compte une seule mesure de rendement, une perturbation, une perte de rendement, le temps nécessaire à la récupération, ou une combinaison de ces éléments. Nous définissons et utilisons une définition de réseau résilient qui sépare la résilience en deux volets : la résilience de la plateforme et la résilience de la mission. La plupart des réseaux complexes ont de multiples mesures de rendement; la présente recherche propose d'utiliser l'analyse décisionnelle à objectifs multiples pour évaluer la résilience des réseaux ayant de multiples mesures de rendement à l'aide de deux méthodes distinctes. La première méthode quantifie la résilience de la plateforme et inclut la résilience et les autres termes en « -ilité » directement dans la hiérarchie des valeurs, tandis que la seconde méthode quantifie la résilience de la mission et utilise les termes en « -ilité » dans le calcul du rendement attendu de la mission pour chaque mesure de rendement dans la hiérarchie des valeurs. Nous illustrons la méthode de résilience des missions à l'aide d'un réseau de systèmes des systèmes de transport dont les niveaux de résilience varient en fonction du niveau de connectivité et d'autonomie des véhicules et de la résilience des plateformes en utilisant un exemple militaire fictif. Notre analyse révèle qu'il est nécessaire de quantifier le rendement dans le contexte de missions et de scénarios spécifiques face à des menaces spécifiques, puis d'utiliser la modélisation et la simulation pour aider à déterminer la résilience d'un réseau pour un ensemble donné de conditions. Cet exemple montre comment l'intégration de la résilience des missions peut améliorer le rendement de certaines mesures de rendement tout en nuisant à d'autres.

Measurement methods and influencing mechanisms for the resilience of large airports under emergency events (en anglais seulement)

Transportmetrica A: Transport Science, 14 (10), 2018, 855-880.

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/23249935.2018.1448016?journalCode=ttra21>

Établit un cadre de mesure de la résilience des grands aéroports, en commençant par les caractéristiques de résilience du transport et en déterminant comment la vulnérabilité et la capacité d'intervention d'urgence affectent la résilience. Ce cadre est ensuite appliqué pour mesurer quantitativement la résilience de l'aéroport international de Pékin-Capitale (PEK); la méthode d'analyse par paires est utilisée pour cerner les principaux facteurs en jeu et déterminer les mécanismes d'influence. Cette caractérisation permet de déterminer comment la vulnérabilité, la capacité d'intervention d'urgence et la résilience de l'aéroport PEK ont évolué au fil du temps. Les résultats montrent que la résilience de l'aéroport PEK s'est améliorée grâce à l'interaction entre la vulnérabilité et la capacité d'intervention d'urgence. La vulnérabilité et la résilience sont principalement des fonctions du secteur côté ville, et la capacité totale d'intervention d'urgence joue également un rôle décisif dans la détermination de la résilience. Ce système d'évaluation montre que le mécanisme, la nature et les indices des facteurs qui affectent la résilience des aéroports diffèrent selon les étapes.

Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions (en anglais seulement)

Transport Reviews, 2018, 38 (4), 479-498.

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01441647.2017.1383532?journalCode=ttrv20>

L'Initiative Ceinture et Route (ICR) a été lancée par le gouvernement chinois pour promouvoir le développement économique mondial et la coopération multilatérale entre la Chine et les pays associés. Composante cruciale des chaînes d'approvisionnement mondiales, le transport joue un rôle essentiel dans la mise en œuvre de l'ICR. La sécurité est l'une des questions qui revêtent une grande importance dans la recherche sur les transports. Toutefois, ses priorités ont été élargies, passant du risque traditionnel à la sécurité puis à la résilience et à la durabilité. Ces dernières années, la résilience a bénéficié d'un intérêt considérable de la part des chercheurs et des praticiens dans différents domaines de recherche. Diverses études ont été menées sur la résilience des transports selon différentes perspectives. Par conséquent, différentes définitions ont été élaborées pour définir et décrire la résilience. Cet article présente un examen systématique de la résilience des transports en mettant l'accent sur ses définitions, ses caractéristiques et les méthodes de recherche appliquée dans différents réseaux/contextes de transport. Il vise à déterminer ce qu'est la résilience des transports et les caractéristiques essentielles qui lui sont habituellement associées. Plus important encore, il analyse les défis auxquels la recherche est confrontée et propose un futur programme de recherche sur la résilience des systèmes de transport. Cet article fournira un éclairage approfondi sur la compréhension de la résilience des transports, et ouvrira de nouveaux horizons pour des sujets de recherche pertinents dans le contexte de l'ICR.

Measuring the Resilience of the Transport Infrastructure in Big Cities (en anglais seulement)

Latin American Conference on Computational Intelligence, IEEE, 2018.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8625202>

La croissance accélérée des villes, les embouteillages, les événements météorologiques et sociaux imprévus ont donné lieu à des scénarios qui perturbent l'harmonie de l'écosystème urbain. Ces événements motivent plusieurs recherches et débats au sein de la communauté scientifique pour tenter d'expliquer les transformations du comportement urbain sous différents aspects, notamment la faiblesse des réseaux urbains. Cet article présente une étude des répercussions d'un événement indésirable sur l'infrastructure de transport d'une ville. Concrètement, nous représentons l'infrastructure de transport d'une ville grâce à un graphique. Ce graphique est analysé en utilisant certaines mesures comme le degré de connectivité, la

densité et la centralité intermédiaire. Par la suite, trois types d'attaques sur le réseau ont été mis en œuvre, c'est-à-dire que des nœuds du réseau ont été systématiquement éliminés, et les caractéristiques du réseau ont été de nouveau mesurées. L'idée sous-jacente est de mesurer, par exemple, si un centre de santé peut demeurer accessible lorsque les routes qui permettent d'y accéder sont fermées en raison d'un événement indésirable (par exemple, un tremblement de terre). Deux villes de deux pays d'Amérique du Sud ont été comparées à différents niveaux de granularité. Nos résultats mettent en évidence la pertinence de notre démarche.

Resilience and efficiency in transportation networks (en anglais seulement)

Science Advances, 2017, 3 (12), art. n° e1701079 (en anglais seulement)

<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1712/1712.08072.pdf>

Les réseaux de transport urbain sont sensibles aux embouteillages, aux accidents, aux intempéries, aux événements spéciaux et à d'autres retards coûteux. Alors que les mesures stratégiques habituelles donnent la priorité à la réduction des retards dans des conditions normales afin d'améliorer l'efficacité des réseaux routiers urbains, le soutien analytique aux investissements qui améliorent la résilience (définie comme la remise en état du système après des perturbations supplémentaires) est encore rare. Dans cet effort, nous représentons les routes pavées sous forme de réseau de transport en faisant correspondre les intersections avec les nœuds et les tronçons de route entre les intersections avec les liens. Nous avons bâti des réseaux routiers pour 40 des zones urbaines définies par le U.S. Census Bureau, le bureau du recensement des États-Unis. Nous avons élaboré et étalonné un modèle pour évaluer les retards dans l'écoulement du trafic en utilisant les charges de liaison. Les charges peuvent être considérées comme des mesures de centralité fondées sur le trafic, estimant le nombre d'individus utilisant les tronçons de route correspondants. L'efficacité a été estimée comme étant le retard annuel moyen par automobiliste navetteur en période de pointe, et les résultats modélisés se sont révélés proches des données observées, à l'exception notable de la ville de New York. La résilience a été estimée comme étant le changement d'efficacité résultant des perturbations routières et s'est avérée varier entre les villes, avec une augmentation des retards due à une perte aléatoire de 5 % des liaisons routières allant de 9,5 % à Los Angeles à 56,0 % à San Francisco. Les résultats montrent que de nombreux réseaux routiers urbains fonctionnant de manière inefficace dans des conditions normales résistent néanmoins aux perturbations, tandis que certaines villes plus efficaces sont plus fragiles. Il en résulte que la résilience, et non seulement l'efficacité, devrait être prise en compte de manière explicite dans la sélection des projets routiers et justifier les possibilités d'investissement liées aux catastrophes et autres perturbations.

Resilience in a Transportation System: A Whole System Approach (en anglais seulement)

Transportation Research Board, 2017.

<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec226.pdf>

*** En particulier la section « Resilience Defined » (*Définition de la résilience*). Cet article explore la définition de la résilience et la manière dont ce concept est lié aux réseaux de transport. Il propose ensuite des idées sur la manière dont la résilience pourrait être intégrée aux pratiques d'ingénierie des transports. Tout au long de cet article, une définition de la résilience en relation avec une perspective globale du réseau a été fournie. L'article donne ensuite les valeurs qui seraient présentes dans un réseau résilient et des exemples de ces valeurs dans un réseau de transport. Enfin, il suggère des indicateurs de résilience afin de fournir des indications sur la mesure du degré de résilience d'un réseau. En appliquant cette approche globale à la résilience d'un réseau de transport, il sera peut-être possible de surmonter un grand nombre de problèmes sociaux, environnementaux et économiques grâce à une conception et à une élaboration de politiques ciblées.

Understanding Transportation Resilience: A 2016–2018 Roadmap (en anglais seulement)
 American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.

https://environment.transportation.org/pdf/infrastructure_resilience/understandingtransresil_jan2017.pdf

*** ** En particulier la section « *Defining Resilience* » (*Définition de la résilience*). Comme c'est souvent le cas dans les nouveaux domaines d'activité ou lors de l'adaptation d'un champ de savoir à un autre domaine, l'élaboration d'un langage commun dont la signification est bien comprise est problématique. Le langage de la résilience ne fait pas exception.

Ces notions fondamentales étaient facilement perçues comme des analogues des caractéristiques souhaitées par les gouvernements, les collectivités et les réseaux complexes tels que les réseaux de transport. Par conséquent, divers organismes ont commencé à définir la résilience en de multiples termes, similaires mais pas complètement congruents.

- Directive présidentielle en matière de politique : « La capacité de se préparer aux conditions changeantes, de s'y adapter, ainsi que de résister aux perturbations et de s'en remettre rapidement. La résilience comprend la capacité de supporter des attaques délibérées, des accidents ou des menaces ou incidents d'origine naturelle et de s'en rétablir. » [traduction libre]
- Le département de la Sécurité intérieure des États-Unis définit la résilience de différentes manières : « La capacité de résister à l'adversité ou à un changement de conditions, de les absorber, de s'en remettre ou de s'y adapter avec succès », ainsi que : « La capacité des réseaux, des infrastructures, du gouvernement, des entreprises et des citoyens à résister à un événement indésirable susceptible de causer des dommages, des destructions ou des pertes d'importance nationale, à les absorber, à s'en remettre ou à s'y adapter » [traduction libre]
- Le 2009 AASHTO–TRB Transportation Hazards & Security Summit, le sommet sur les risques et la sécurité dans les transports de 2009 de l'AASHTO et du TRB, a proposé une définition complète de ce qu'est la résilience : « La capacité d'un réseau à assurer et à maintenir un niveau de service ou de fonctionnalité acceptable en cas de chocs ou de perturbations importants du fonctionnement normal.
 - Une caractérisation du système des systèmes dans les « réseaux essentiels », notamment l'électricité, l'eau, la connectivité et la mobilité, en se concentrant sur la fourniture de ces services essentiels en priorité.
 - Des systèmes d'autodiagnostic, d'autoguérison et d'auto-réparation qui présentent moins d'interruptions de service à long terme et des coûts de cycle de vie plus faibles.
 - Des systèmes durables, économes en énergie et axés sur le rendement. » [traduction libre]
- Le SCOTSEM d'AASHTO définit la résilience comme « la capacité de se préparer à des événements défavorables, de les absorber, de s'en remettre ou de s'y adapter avec plus de succès » (traduction libre, texte source adapté de la publication « *Disaster Resilience: A National Imperative* », National Research Council, 2012).
- La Resilient America Roundtable (table ronde sur l'Amérique résiliente) des National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, les académies nationales des sciences, de l'ingénierie et de la médecine des États-Unis, a également adopté la définition ci-dessus, soit « la capacité de se préparer à des événements défavorables, de les absorber, de s'en remettre ou de s'y adapter avec plus de succès ».
- Le décret 5520 de l'Administration fédérale des autoroutes (Federal Highway Administration, FHWA) définit la résilience comme étant « ... la capacité d'anticiper les conditions changeantes, de s'y

préparer et de s’y adapter, ainsi que de résister aux perturbations, d’y réagir et de s’en remettre rapidement » [traduction libre].

- La Harbor Safety Committee Conference, la conférence du comité de la sécurité portuaire, a défini la résilience comme étant « la capacité de se remettre et de rétablir rapidement les services vitaux avec un minimum de perturbations » [traduction libre].
- Le Reform Institute, organisme des États-Unis non partisan et à but non lucratif, suggère que la résilience consiste à « atténuer les effets négatifs en cascade d’une attaque terroriste ou d’une catastrophe naturelle afin que la nation puisse se rétablir rapidement et reprendre une activité normale après un tel événement » [traduction libre].

Track support measurements for improved resiliency of railway infrastructure (en anglais seulement)

Transportation Research Record, 2017, 2607 (1), 54-61.

<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/2607-08>

Le soutien des rails est nécessaire pour garantir la fiabilité et la résilience de l’infrastructure ferroviaire. La capacité de se remettre rapidement de situations adverses est une caractéristique de l’industrie ferroviaire, et la capacité de remettre rapidement les voies en service est un élément principal contribuant à la résilience du service ferroviaire. De mauvaises conditions de soutien des rails peuvent augmenter les charges dynamiques et de chocs sur les composants de la superstructure de la voie, ce qui peut accélérer la détérioration des composants de la voie, et potentiellement nuire à la résilience de la voie ferrée. Au fur et à mesure que les composants de la voie se détériorent ou que les propriétés des matériaux continuent de se dégrader dans une zone, les traverses concernées perdent leur soutien et transfèrent leur charge à des traverses mieux soutenues. Divers problèmes se développent en raison de l’augmentation de la charge sur les traverses, de la contrainte sur le rail et de la contrainte sur le ballast, ce qui entraîne une dégradation du ballast ainsi que des vibrations au niveau de la voie ou des traverses. Ces problèmes peuvent être évités si un soutien adéquat des rails est fourni de manière uniforme afin qu’aucune zone ne soit soumise à une contrainte excessive. Plusieurs techniques de mesure sont examinées concernant l’évaluation des éléments de soutien des rails : le module et les déplacements transitoires, y compris les techniques de déflexion des voies, les caméras vidéo, les accéléromètres, l’analyse spectrale des ondes de surface pour l’évaluation des modules de la sous-couche, et le déflectomètre à masse tombante pour les analyses de déflexion et de bassin. Ces techniques de mesure sont comparées et mises en opposition, elles sont illustrées à l’aide d’un exemple de capacité de charge des rails, et leur utilité est démontrée pour évaluer les problèmes de traverses et de soutien de rails dans le but d’améliorer l’inspection et la maintenance aux endroits problématiques. Les données issues de ces tests peuvent être utiles pour concevoir des plans d’entretien des voies afin d’éviter les défaillances au niveau des éléments de soutien des rails, une étape nécessaire à la résilience des infrastructures ferroviaires.

The conceptual framework of resilience and its measurement approaches in electrical power systems (en anglais seulement)

IET Conference Publications, 2017 (CP727).

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8361387>

L’évaluation de la résilience des réseaux complexes et à grande échelle, tels que les réseaux électriques, est devenue un élément indissociable de l’analyse de la fiabilité des réseaux en présence d’incidents peu probables mais ayant des répercussions considérables, tels que les catastrophes naturelles extrêmes. Compte tenu de l’application de la résilience dans divers domaines, on peut trouver différentes définitions pour évaluer la résilience d’un réseau et plusieurs approches peuvent être appliquées pour la mesurer. Il est de plus en plus évident qu’il est nécessaire d’accroître la résilience des infrastructures du réseau électrique en réponse aux catastrophes peu probables mais ayant des répercussions considérables, afin d’alimenter au

minimum les charges d'urgence en cas d'événements inattendus et catastrophiques. L'évaluation de la fiabilité des réseaux électriques indique le comportement probable d'un réseau dans des conditions normales, mais ne parvient pas à modéliser les imprévus d'ordre supérieur qui ont de faibles probabilités de se produire. Cependant, résister aux événements peu probables mais ayant des répercussions considérables, les absorber et s'en remettre rapidement demeure un défi de taille qui peut être analysé dans le cadre de l'évaluation de la résilience. Cet article présente un cadre conceptuel des domaines de la résilience et ses approches en ce qui a trait à la mesure, en particulier un cadre conceptuel approfondi de la résilience comme sous-catégorie de la vulnérabilité dans les réseaux électriques. Cette recherche présente également la différence conceptuelle entre la résilience et d'autres indices d'évaluation des réseaux électriques tels que la fiabilité, le risque et la sécurité.

Resilience and robustness in long-term planning of the national energy and transportation system (en anglais seulement)

Iowa State University, 2017

https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1186&context=ece_pubs

Les infrastructures qui consomment le plus d'énergie et qui contribuent le plus aux gaz à effet de serre dans les pays développés sont les réseaux électriques et les réseaux de transport de marchandises et de passagers. Il existe de nombreuses autres solutions technologiques pour produire, transporter et convertir l'énergie destinée aux réseaux électriques et de transport. La prise en compte des coûts, de la durabilité et de la résilience des besoins en matière d'électricité et de transport nécessite une évaluation à long terme, car la construction de ces infrastructures à très forte concentration de capitaux prend des années et leur durée de vie approche le siècle. Pourtant, l'avènement des modes de transport électriques, notamment les voitures, les camions et les trains, crée de potentielles interdépendances entre les deux infrastructures qui peuvent être à la fois problématiques et avantageuses. Nous développons une capacité de modélisation permettant de concevoir des infrastructures électriques et de transport à long terme au niveau national, en tenant compte de leurs interdépendances. L'approche combine la modélisation du flux du réseau avec une méthode de résolution à objectifs multiples. Nous le décrivons et le comparons à ce qui se fait de mieux en matière de modèles de planification énergétique. Un exemple est présenté pour illustrer les caractéristiques de cette nouvelle approche.

Review of performance metrics for community-based planning for resilience of the transportation system (en anglais seulement)

Transportation Research Record, 2017, 2604 (1), 44-53.

https://depts.washington.edu/sctlctr/sites/default/files/research_pub_files/Review%20of%20Performance%20Metrics%20for%20Community-Based%20Planning%20for%20Resilience%20of%20the%20Transportation%20System.pdf

La résilience des collectivités dépend de la résilience des infrastructures essentielles et de la bonne exécution des fonctions liées aux catastrophes par les gouvernements locaux. Les plans et les lignes directrices de l'État et de l'administration fédérale en matière de résilience reconnaissent l'importance du réseau de transport en tant que ressource essentielle dans la planification de la résilience des collectivités et dans l'aide apportée aux gouvernements locaux pour fixer des objectifs de reprise après sinistre. Cependant, il n'existe pas de définition largement acceptée de la résilience du réseau de transport ni de structure permettant de la mesurer. Cet article propose un examen de la littérature qui résume les indicateurs utilisés pour évaluer la résilience du réseau de transport et une catégorisation des approches d'évaluation à trois niveaux d'analyse (actifs, réseau et systèmes). En outre, il établit un lien entre ces indicateurs et les dimensions pertinentes de la résilience des collectivités. Ce travail aborde une première étape clé nécessaire pour améliorer l'efficacité de la planification liée à la résilience du réseau de transport en fournissant (a) une

terminologie normalisée avec laquelle les efforts pour améliorer la résilience du réseau de transport peuvent être développés, (b) une approche pour organiser la planification et les efforts de recherche liés à la résilience du réseau de transport, et (c) l'identification des lacunes dans la mesure du rendement de la résilience du réseau de transport.

A multi-criteria methodology for measuring the resilience of transportation assets (en anglais seulement)
International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment, 2016, 7 (3), 290-301.

<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJDRBE-07-2014-0053/full/html>

But : L'évaluation et la hiérarchisation des projets dans le domaine des transports s'appuient sur les mesures traditionnelles du rendement, notamment la durée des trajets, la sécurité, les coûts pour les usagers, l'efficacité économique et la qualité de l'environnement. Les incidences du projet en ce qui a trait au renforcement de la résilience des infrastructures ou à l'atténuation des conséquences des dommages aux infrastructures en cas de catastrophe sont rarement prises en compte dans l'évaluation du projet. Cet article a pour but de présenter une méthodologie permettant de répondre à cette question afin que, au moment de définir les priorités d'investissement, les infrastructures à faible sécurité puissent recevoir l'attention qu'elles méritent. Deuxièmement, la méthodologie peut être utilisée pour classer par ordre de priorité les investissements candidats à partir d'un budget consacré spécifiquement au renforcement de la sécurité.

Conception/méthodologie/approche : En définissant la sécurité comme l'absence de risque de dommages causés par des menaces résultant d'une résilience structurelle ou fonctionnelle inhérente, cet article utilise des considérations liées à la sécurité dans la hiérarchisation des investissements, introduisant ainsi la robustesse dans une telle évaluation. Dans la mesure où cela entraîne une augmentation du nombre de critères de rendement dans l'évaluation, le document adopte une approche d'analyse à plusieurs critères. La méthodologie de l'article quantifie le niveau de sécurité global d'une infrastructure en fonction des menaces auxquelles elle est confrontée, de sa résilience aux dommages et des conséquences en cas d'endommagement de l'infrastructure. Constatations : L'article démontre qu'il est possible d'élaborer une mesure liée à la sécurité qui puisse être utilisée comme critère de rendement dans l'évaluation de projets de transport généraux ou de projets visant spécifiquement l'amélioration de la sécurité. À travers une étude de cas, l'article applique la méthodologie en mesurant le risque (et donc la sécurité) de chaque projet pour plusieurs infrastructures. Sur la base des multiples types de conséquences, y compris les conséquences sur le risque (c'est-à-dire l'augmentation de la sécurité) de chaque investissement candidat, l'article montre comment classer par ordre de priorité les investissements en matière de sécurité dans les différentes infrastructures à l'aide d'une analyse à plusieurs critères. Originalité/valeur : Le cadre général est constitué des étapes traditionnelles de la gestion des risques, et la contribution spécifique de cet article concerne la partie du cadre qui mesure le risque. L'article montre comment la sécurité des infrastructures peut être quantifiée et intégrée dans le processus d'évaluation des projets.

Toward quantifying metrics for rail-system resilience: identification and analysis of performance weak resilience signals (en anglais seulement)

Cognition, Technology and Work, 2016, 18 (2), 319-331.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10111-015-0356-9>

Cet article vise à améliorer la tangibilité du concept d'ingénierie de la résilience en facilitant la compréhension et l'opérationnalisation des signaux de faible résilience dans le secteur ferroviaire. Dans les systèmes sociotechniques complexes, les accidents peuvent être considérés comme des résultats indésirables émergeant de sources incontrôlées d'entropie (résonance fonctionnelle). Il existe différents modèles théoriques pour déterminer la variabilité des interactions du système, l'état de résilience et les capacités intrinsèques de l'organisation à réorganiser et gérer leur fonctionnement et leur capacité d'adaptation pour faire face aux perturbations inattendues et imprévues. Cependant, l'opérationnalisation

et la mesure des manifestations concrètes et fiables de la résilience et l'évaluation de leur incidence au niveau du système se sont révélées être des défis. Un questionnaire multiméthode sur l'observation ethnographique et la résilience a été utilisé pour déterminer les conditions de base de la résilience à un poste de contrôle du trafic ferroviaire opérationnel. Cet article décrit l'élaboration, la mise en œuvre et la validation initiale des signaux de faible résilience identifiés et modélisés à partir d'une « limite du système de rendement ». De plus, une fonction d'analyse des signaux de faible résilience est introduite pour interpréter les facteurs sous-jacents des signaux de faible résilience de la performance et sert de méthode pour révéler les sources potentielles de résonance future qui pourraient inclure la résilience du système. Les résultats indiquent que les signaux de faible résilience du rendement peuvent être mis en œuvre avec succès pour accentuer les écarts relatifs par rapport aux conditions de base de la résilience. Une fonction d'analyse des signaux de faible résilience peut aider à interpréter ces divergences et pourrait être utilisée pour révéler des processus de changement et des événements déclencheurs passés inaperçus qui facilitent l'émergence d'incidents provoquant une dégradation de la résilience du système ferroviaire. L'établissement de signaux de changement pertinents à l'avance peut contribuer à l'anticipation et à la prise de conscience, améliorer l'apprentissage organisationnel et stimuler des plans d'action résilients et un comportement adaptatif qui garantissent la fiabilité de l'exploitation ferroviaire.

A model to quantify the resilience of mass railway transportation systems (en anglais seulement)

Reliability Engineering and System Safety, 2016, 153, 1-14.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832016300059>

Les approches traditionnelles de la gestion des risques sont axées sur la probabilité des événements perturbateurs et leurs conséquences. Cependant, les événements récents démontrent que les événements perturbateurs ne sont pas tous prévisibles. Le concept de résilience a été mis en place pour mesurer non seulement la capacité du système à absorber les perturbations, mais aussi sa capacité à se rétablir rapidement après ces perturbations. Dans cet ouvrage, nous proposons un modèle basé sur la simulation pour quantifier la résilience des systèmes de transport ferroviaire de masse en quantifiant le retard des passagers et la charge des passagers comme indicateurs de rendement du système. Nous intégrons tous les sous-systèmes qui composent les systèmes de transport ferroviaire de masse (sous-systèmes de transport, d'énergie, de télécommunication et d'organisation) et leurs interdépendances. Le modèle est appliqué au système de transport ferroviaire de masse de Paris. Les résultats du modèle indiquent que puisque les trains continuent de circuler dans le système même en diminuant leur vitesse, le système reste résilient. Le modèle présente des similitudes avec la réalité aussi bien lors du fonctionnement normal du système que lors de perturbations. Le plan de gestion des perturbations qui consiste à mettre en place des services ferroviaires temporaires sur une partie de la ligne concernée pendant la réparation du composant défaillant du système est envisagé dans cet ouvrage. Nous évaluons également dans quelle mesure les capacités de certains systèmes résilients (c'est-à-dire l'absorption, l'adaptation et le rétablissement) peuvent accroître la résilience du système.

Measuring Transportation System Resilience: Response of Rail Transit to Weather Disruptions (en anglais seulement)

Natural Hazards Review, 2016, 17 (1), art. n° 05015004.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832016300059>

Les perturbations majeures des systèmes de transport en raison d'événements météorologiques violents tels que des ouragans, des ondes de tempête et des inondations sont de plus en plus courantes. Une réponse logique consiste à rendre ces systèmes plus aptes à résister à des événements météorologiques de grande ampleur et à s'en remettre. La résilience est le terme couramment utilisé pour décrire cette propriété des systèmes de transport, et bien qu'il existe de nombreuses définitions, il n'y a pas d'indicateur couramment

utilisé pour la caractériser. Cet article examine le concept de résilience dans différents domaines et propose une définition qui englobe trois stratégies courantes pour rendre les systèmes de transport plus résilients : le durcissement, la redondance et l'élasticité. Il propose un indicateur graphique et analytique pour évaluer la résilience des services de transport réguliers face aux perturbations météorologiques, en se concentrant sur les systèmes de métro. Le concept de jours de service planifiés perdus en raison de perturbations météorologiques est suggéré comme une mesure globale utile de la résilience du système, qui est normalisée pour l'échelle du système. La mesure est appliquée aux données du système de transport ferroviaire de la New York Metropolitan Transportation Authority pour illustrer les effets des ouragans Irene et Sandy, ainsi que d'une grosse tempête de neige qui a frappé la ville de New York, et pour suggérer les moyens par lesquels les mesures proposées peuvent être utilisées pour évaluer a posteriori la réponse aux événements météorologiques, mais aussi soutenir les décisions de gestion du système. Une application comparative de la mesure au métro de New York et au train de banlieue du New Jersey illustre l'utilisation de cette mesure normalisée dans deux services de transport en commun différents.

Définir la résilience : Examen intégratif préliminaire de la littérature (en anglais seulement)

Conférence internationale de l'American Society for Engineering Management (ASEM), 2016. (en anglais seulement)

https://www.researchgate.net/publication/289970511_What_is_resilience_An_Integrative_Review_of_the_empirical_literature

Le terme « résilience » est omniprésent dans la littérature technique : il apparaît sous de nombreuses formes, telles que « résilience » ou « résilient », et chaque utilisation peut faire référence à une définition différente selon l'interprétation de l'auteur. Cela crée des difficultés pour comprendre ce que l'on entend par « résilience » dans un cas d'utilisation donné, en particulier dans les discussions sur la recherche multidisciplinaire. Pour mieux comprendre ce problème, cette recherche procède à un examen intégratif préliminaire de la littérature pour cartographier les différentes définitions, applications et méthodes de calcul de la résilience utilisées dans les applications d'infrastructures essentielles. L'examen préliminaire utilise une méta-analyse matricielle de type SAM pour caractériser les différences de définition entre les disciplines et entre les régions. La qualification des différents usages de la résilience produira une plus grande précision dans la littérature et une compréhension plus approfondie des types de données nécessaires à son évaluation, notamment en ce qui concerne les calculs d'infrastructures essentielles et la manière dont ces données peuvent être analysées. Les résultats de cette analyse SAM créeront un cadre de concepts clés s'inscrivant dans les applications les plus courantes pour modéliser les « infrastructures essentielles résilientes ».

Transportation Resilience: A summative review on Definition and Connotation (en anglais seulement), Conférence internationale sur l'automatisation, le contrôle mécanique et l'ingénierie informatique, 2015, <https://www.atlantis-press.com/proceedings/amcce-15/20213>

Les systèmes de transport urbain souffrent toujours de diverses perturbations dues à des incidents naturels et des incidents causés par l'homme. Ces perturbations peuvent entraîner une défaillance du système et occasionner ainsi une perte plus importante pour l'ensemble de la société. Le concept de résilience a été introduit dans les systèmes de transport, car ceux-ci étaient préoccupés par leur rendement en cas de perturbations. La résilience a initialement été décrite comme étant la capacité du système à redevenir sain et solide après un événement perturbateur. En ce qui concerne la résilience des transports, un certain nombre de chercheurs ont mené des recherches exploratoires sous différents angles. Cependant, les définitions et les connotations qu'ils recommandaient étaient assez diverses. Cet article a procédé à un examen sommatif de ces définitions et connotations, et a tenté d'élaborer une description intégrée de ce

qu'est un système de transport résilient et des caractéristiques qu'il devrait posséder. Il s'agit d'un travail fondamental pour mettre en pratique le concept de résilience.

A new measure of resilience: An application to the London Underground Transportation Research Part A: Policy and Practice (en anglais seulement), 2015, 81, 35-46.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856415001457>

Les nombreux points de vue différents sur la résilience indiquent qu'il s'agit d'un concept important dans de nombreuses disciplines, de l'écologie à la psychologie en passant par la gestion des risques et des catastrophes. Par conséquent, il est important de pouvoir mesurer de manière quantifiable la résilience des systèmes, et ainsi pouvoir prendre des décisions sur la manière dont la résilience du système peut être améliorée. Dans cet article, nous utiliserons la définition que l'on doit à Pimm (1991), selon laquelle la résilience est « la vitesse à laquelle une variable qui a été déplacée de l'équilibre y retourne ». Nous considérerons un système comme étant plus ou moins résilient en fonction de la vitesse à laquelle il se remet des événements perturbateurs ou des chocs. Nous examinons ici des systèmes qui reviennent à un état d'équilibre à la suite de chocs, et introduisons une mesure de la résilience en quantifiant la rapidité de rétablissement de ces systèmes après les chocs. Nous utilisons un modèle stochastique de retour à la moyenne pour étudier les effets diffusifs des chocs et nous appliquons ce modèle au cas du métro de Londres. Lorsqu'un choc se diffuse à travers le réseau, le flux de personnes dans le réseau se remet du choc. La vitesse à laquelle le nombre de passagers revient à la normale est un indicateur de la rapidité avec laquelle la ligne est capable de se remettre du choc et de reprendre par la suite son activité normale.

Development of Resilience Index in Transport Systems (en anglais seulement), Université Purdue, 2015.

<https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1012&context=i3r2>

Cet article démontre la quantification de l'indice de résilience (IR) dans les systèmes de transport. Les infrastructures de transport peuvent être gérées en s'appuyant sur les concepts de résilience.

Transportation Sector Resilience (en anglais seulement)

National Infrastructure Advisory Council, 2015, <https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/niac-transportation-resilience-final-report-07-10-15-508.pdf>

Le système de transport national est crucial pour l'économie américaine et la qualité de vie globale des Américains de tous horizons. Dans la société d'aujourd'hui, qui est de plus en plus complexe et connectée, chaque secteur des infrastructures essentielles dépend d'un système de transport résilient qui est à la fois sûr, sécurisé, fiable et efficace pour permettre la circulation des personnes et des marchandises. Sans lui, la plupart des services essentiels cessent de fonctionner. En reconnaissance de ce rôle important, le président a demandé au National Infrastructure Advisory Council (NIAC) d'examiner la résilience du secteur des transports du pays afin de déterminer les lacunes potentielles et de cibler les possibilités pour le gouvernement fédéral d'améliorer la résilience et la sécurité du secteur. Tout au long de cette étude, *la résilience des infrastructures est définie* comme étant la capacité à réduire l'ampleur ou la durée des événements perturbateurs en anticipant la perturbation, en l'absorbant, en s'y adaptant ou s'en remettant rapidement. Pour simplifier, les systèmes résilients peuvent maintenir des fonctions essentielles pendant une perturbation et nécessitent moins de temps et moins de ressources pour rétablir les fonctions qui se sont dégradées.

A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems (en anglais seulement)

Reliability Engineering and System Safety, 2014, 121, 90-103.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832013002147>

Nous avons examiné différentes approches pour définir la résilience et l'évaluation de la résilience. Nous avons constaté que si la résilience est un concept utile, sa diversité d'usages complique son interprétation et sa mesure. Dans cet article, nous avons proposé un cadre d'analyse de la résilience et un indicateur pour mesurer la résilience. Notre cadre d'analyse comprend l'identification du système, la définition des objectifs de résilience, l'analyse de la vulnérabilité et la participation des intervenants. La mise en œuvre de ce cadre est axée sur l'atteinte de trois capacités de résilience : la capacité d'adaptation, la capacité d'absorption et la capacité de rétablissement. Ces trois capacités forment également la base de notre proposition de facteur de résilience et de mesure de la résilience pondérée par l'incertitude. Nous avons également relevé deux discussions importantes non résolues émergeant dans la littérature : l'idée de la résilience en tant que propriété épistémologique par opposition à propriété inhérente du système, et la conception de la résilience écologique par rapport à la résilience artificielle dans les systèmes sociotechniques. Bien que nous n'ayons pas résolu ces questions, nous avons montré que notre cadre et notre indicateur favorisent l'élaboration de méthodologies pour enquêter sur les incertitudes « profondes » liées à l'évaluation de la résilience, tout en conservant l'utilisation de la probabilité pour exprimer les incertitudes sur les risques hautement incertains, imprévisibles ou inconnus dans les activités de conception et de gestion.

Measuring Transport Resilience Massey University (en anglais seulement), Université Massey, Nouvelle-Zélande, 2014. (en anglais seulement)

<https://mro.massey.ac.nz/bitstream/handle/10179/5725/Measuring%20Transport%20Resilience.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

Cyber resilience: a review of critical national infrastructure and cyber security protection measures applied in the UK and USA. (en anglais seulement)

Journal of business continuity & emergency planning, 2013, (2), 149-162.

https://link.springer.com/chapter/10.1057/9781137455550_10

Cet article présente la cyberrésilience comme un élément essentiel de la sécurité nationale. Il souligne l'importance de protéger les infrastructures nationales essentielles et le caractère de plus en plus indirect des cyberattaques à distance, parfaitement planifiées et exécutées, sur les infrastructures essentielles. Des exemples de cyberattaques historiques bien connues y sont mentionnés, et la question de l'émergence de l'Internet des objets en tant que problème de cybervulnérabilité à résoudre y est abordée. L'article répertorie les principales mesures prises par les personnes responsables de la détection, de la prévention et de la perturbation des cyberattaques sur les infrastructures nationales essentielles au Royaume-Uni et aux États-Unis.

Resistance and resilience - paradigms for critical local infrastructure (en anglais seulement)

Comptes rendus de l'Institution of Civil Engineers : Municipal Engineer, 2012, 165 (2), 73-84.

<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/muen.11.00030>

Le terme « infrastructures essentielles » désigne généralement des installations et équipements importants tels que des centrales électriques et des autoroutes. Les fortes densités de population dans les villes et l'interconnectivité croissante des services et des chaînes d'approvisionnement qui les soutiennent font que les infrastructures locales sont tout aussi importantes. Les infrastructures locales doivent être en mesure de résister aux chocs reçus par les systèmes, qu'ils résultent de risques naturels, d'actes de terrorisme ou de défaillances catastrophiques. La conception technique joue un rôle prépondérant dans cette résistance, mais il arrive malheureusement que des chocs soient si violents que même la conception la plus prudente ne parvienne pas à y faire face. Les infrastructures locales doivent donc être capables de s'adapter à ces chocs et de s'en remettre : c'est ce qu'on appelle la résilience. Les infrastructures locales ont évolué en tenant très peu compte de la résilience du système interconnecté dans son ensemble, alors que la résilience a fait l'objet

de nombreux travaux de recherche dans de nombreux autres systèmes. Cet article se penche sur les enseignements que les infrastructures locales peuvent tirer de ces travaux de recherche en examinant la littérature sur la résilience des infrastructures écologiques, économiques et physiques, et les systèmes communautaires/sociaux et gouvernementaux. Une analyse critique met en exergue les facteurs ayant une incidence sur la résilience et les différentes approches qui doivent être prises en compte lorsqu'on souhaite modéliser des infrastructures à une échelle locale.

Sustainability and resiliency measures for long-term investment planning in integrated energy and transportation infrastructures (en anglais seulement)

Journal of Energy Engineering, 2012, 138 (2), 87-94.

<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29EY.1943-7897.0000067>

Des mesures du rendement complètes et révélatrices sont essentielles à l'évaluation des plans d'investissement à long terme. Cet article définit trois mesures du rendement pour une planification des investissements à long terme dans des infrastructures d'énergie et de transport intégrées : coût, durabilité et résilience. Si la première mesure peut être définie relativement simplement, ce n'est pas le cas des deux autres mesures, pour lesquelles il existe une ambiguïté et une divergence de points de vue au sujet de leurs définitions. Bien que différentes descriptions qualitatives aient été faites dans divers contextes de recherche, peu d'études ont fourni de définitions quantitatives. Cet article fournit des définitions quantitatives des mesures de durabilité et de résilience adéquates pour évaluer les décisions d'investissement à long terme dans un système d'énergie et de transport intégré. La durabilité se définit comme la durée pendant laquelle le système sera en mesure de satisfaire aux exigences opérationnelles et environnementales. La résilience se mesure par le coût nécessaire pour passer d'un état antérieur à une contingence à un état postérieur à un rétablissement. Une étude de cas sur les réseaux de transport de charbon et de transport d'électricité aux États-Unis est réalisée pour démontrer les méthodes d'évaluation.

Transportation Resilience Metrics Committee (en anglais seulement)

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016 <https://www.nationalacademies.org/our-work/transportation-resilience-metrics#sectionCommittee>

Le comité déterminera et examinera les indicateurs qui peuvent être utilisés pour évaluer la résilience des infrastructures existantes et élaborer la planification des investissements dans les infrastructures des divers modes de transport de passagers et de marchandises (terrestre, maritime et aérien). Aucun rapport n'est disponible, mais il y a les coordonnées des membres du comité si l'on souhaite communiquer avec eux.